

# 走化性を考慮した複数車線交通流

藤井 雅史, 西森 拓, 栗津 暁紀

広島大学大学院 理学研究科 数理分子生命理学専攻

## 概要

複数車線交通流の格子モデルに、アリのフェロモンによる走化性を模した粒子(車)同士の相互作用を導入し、車線数、フェロモンの蒸発率、及び粒子密度の変化に対する流量の変化について議論した。その結果、i) 一方向通行では車線数が多いほど流量が最大となる密度が大きく、フェロモン蒸発率が低いほど流量は大きくなる。ii) 双方向通行では粒子密度によって流量を最大とするフェロモン蒸発率は異なり、粒子密度が高くなると、全空間にフェロモンがあるよりも適度に蒸発した方が渋滞を回避しやすくなることが分かった。

## Multiple Lanes Traffic Flow including the Effect of Chemotaxis

Masashi Fujii, Hiraku Nishimori, Akinori Awazu

Department of Mathematical and Life Sciences, Hiroshima University.

## Abstract

Using a cell model for one way and two way traffic flow including the effect of chemotaxis, we study the relation between the car density and the flux with varying the number of lanes and the evaporation rate of pheromone. The numerical results indicate that i) In the one way flow, the car density recording the maximum flux shifts to the larger one as the number of lanes becomes greater, and for all range of car density the flux decreases as the evaporation rate of pheromone increases. ii) On the other hand, in the two way flow, the flux increases as the evaporation rate of pheromone increases up to a finite value for a certain range of car density.

## 1 はじめに

カーナビゲーションシステムの改良や巡回セールスマン問題などへの対処のために、現在まで様々な最適化アルゴリズムが研究されている。近年ではそのような研究の一つの方向として、生物の仕組みを参考にしたアルゴリズムの開発が盛んに行われている。その中でも、アリの採餌行動のメカニズム(フェロモンと呼ばれる化学物質を介して他のアリと局所的に情報をやりとりし、餌と巣を結ぶ行列を作って効率よく餌を集めるメカニズム)を用いた、交通流やアリの採餌行動における最短経路探索問題や渋滞回避の問題、ジャミング問題に関する研究が、徐々に進展しつつある [1][2][3]。今回我々は、西成らによって考えられてきた ATM(ant-trail

model:アリ追跡モデル [3]) を拡張したモデルを用い、フェロモンによる相互作用を取り入れた一方向複数車線交通流、及び双方向複数車線交通流の性質を議論した。特に、粒子の密度とフェロモン蒸発率をパラメータとして変化させることで、もっとも流れが最適となるような密度とフェロモン蒸発率の関係について、考察した。

## 2 複数車線の一方向通行モデル

まず、フェロモンによる相互作用を取り入れた一方向複数車線交通流を考察するために、西成らの一車線 ATM を複数車線に拡張したモデルを導入する。道路長  $L$  は 1000 セルとし、各セルに粒子は 1 つしか入ることが出来ないとする。また、各セルは

フェロモンが「有る」・「無い」の2状態 {0 or 1} をとるとする。粒子は前方(図1で右方向)に進み、境界条件は周期境界条件とした。初期条件として、粒子を空間中にランダムに配置し、各時間ステップごとにランダムに選択した粒子の移動を総粒子数回繰り返すとする。次の時間ステップに移る前に、粒子がいるセルにはフェロモンを置き(分泌)、粒子がいないセルからは確率  $f$  でフェロモンを取り除く(蒸発)。粒子の進路は、図1左下で示されているように、1:前方、2:斜め前方という優先順位で、空いているセルが選択されるとするを進路として選択する。また、いずれのセルも埋まっているときは移動はしないとする。粒子の移動は、進路に選択したセルにフェロモンがあれば確率  $Q$  で、なければ確率  $q$  で行う(ただし、 $Q > q$ )。

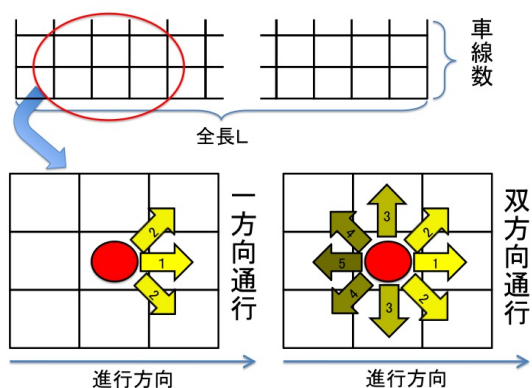


図1: 各セルにおける進路の選択方法

以後このモデルを一方向モデルと呼ぶことにする。シミュレーションでは  $Q = 0.95$ ,  $q = 0.25$  で  $f$  を 0.0, 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 と変化させた。以上のモデルで、車線数を1から4まで変化させつつ、密度と流量の関係を調べた。車線数が1の場合の結果は西成らの先行研究の結果 [3] と一致した。

車線数が2から4の場合、車線数が1のときと同様に蒸発率を変化させると密度と流量の関係は図2のようになった。車線数が1を赤、2を緑、3を青、4を紫で示した。どの車線数においても、蒸発率が低いほど流量も大きくなる。蒸発率が0.001や0.01の場合、粒子密度が低いと流量の小さい状態が実現する。これは、ある粒子が分泌したフェロモンが蒸発する前に、別の粒子がそのセルに辿り着く確率が低くなるためである。それに対し粒子密度が高いと、フェロモンが蒸発する前に粒子が辿り着く確率が高くなる。そのためフェロモンが空

間全体に分布しやすく、蒸発がなく高い流量を実現する状態に近い状態が現れる。また中間の粒子密度で流量が飛躍的に上昇している領域が存在する。この領域では上記2つの状態がそれぞれ準安定的に実現し、確率的に遷移している。これらの結果も西成らの先行研究の1車線の場合と同様の結果である [3]。また、車線数の増加に伴い、流量が最大となる密度が徐々に大きくなる傾向が見られる。これは車線数の増加により、粒子の流れが滞りにくくなるためと考えられる。

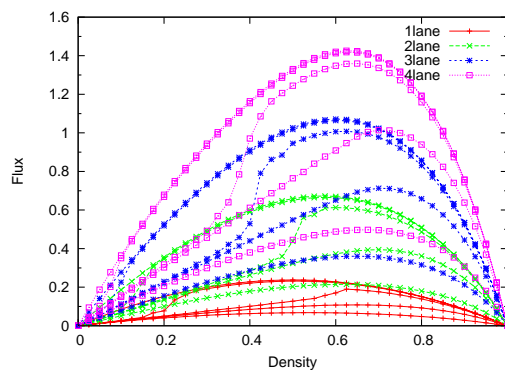


図2: 一方向モデルの基本図。車線数1 (赤)・同2 (緑)・同3 (青)・同4 (紫)。  $f = 0.0, 0.001, 0.01, 0.1, 1.0$ 。横軸密度・縦軸流量

### 3 複数車線の双方向通行モデル

次に前述の一方向モデルを、以下のように拡張したモデルを用いて、フェロモンを介した相互作用を取り入れた双方向交通流の振舞いについて考察する。まず各粒子は、右方向または左方向を進行方向とする、2つの状態をとるとする。各粒子の進路は、図1右下(この図では右方向を進行方向としている)で示されているように、1:前方、2:斜め前方、3:真横、4:斜め後方、5:後方という優先順位で、空いているセルが選択されるとする。また、フェロモンに方向性はなく、どちら向きの粒子も同様にフェロモンを分泌、感知するものとし、粒子の移動確率・方法、フェロモンの分泌、蒸発の規則は前述のモデルと同じとする。以下シミュレーションでは、道路の全長  $L$  を 1000 セルとし、粒子が右(左)端まで進むと、今度は向きを変えて左方向(右方向)に進行方向を変えるものとする<sup>1,2</sup>。

<sup>1</sup>右方向に進む粒子数と左方向に進む粒子数を等しくし、境界を周期境界とした場合でも、定性的に同じ結果が得られた。

<sup>2</sup>フェロモンによる相互作用を取り入れた粒子(アリ)の双方向交通流モデルは西成らによっても提案されている [3]。そのモ

このモデルでは、車線数が1の場合、粒子数が2以上では必然的に衝突が起こり、そのまま粒子がその場に停滞するため、流量は0となる。これが複数車線になると状況は変わってくる。図3が2車線の場合の基本図で、赤色で示されたグラフが蒸発率  $f = 0.0$  のグラフ、緑色が  $f = 0.01$ 、青色が  $f = 0.3$ 、紫色が  $f = 1.0$  である。双方方向通行の場合、粒子の衝突回数が増加するため、流量は一方向モデルに比べかなり減少し、ピークの位置もかなり低密度領域に現れた。蒸発率別に見ると、 $f = 0.0$  のときは密度 0.07 付近に、 $f = 0.01$  のときは密度 0.04 付近に、 $f = 0.3$  のときは密度 0.1 過ぎに、 $f = 1.0$  のときは密度 0.09 付近にピークが現れた。また、蒸発率  $f$  に対する流量の最大値と有限の流量をもつ密度の最大値 (渋滞で完全停止する密度) は  $0.01 < f < 0.3$  で増加し、 $0.3 < f < 0.8$  でほぼ一定で、 $f > 0.8$  では減少した。車線数3のときはピークの山が全体的に右にシフトし、全体的な流量も上昇しているが、定性的には同じであった。

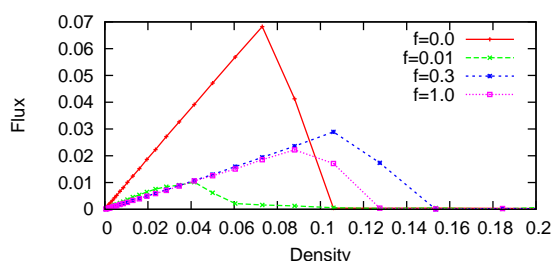


図3: 2車線・双方向モデルでの基本図。フェロモン蒸発率  $f = 0.0$  (赤)、 $0.01$  (緑)、 $0.3$  (青)、 $1.0$  (紫)。密度は0から0.2まで。横軸密度・縦軸流量

次に車線数が2の場合の各密度・蒸発率における粒子の位置の時空間発展を見ていく。 $f = 0.01$  で密度が0.04の場合は、所々で渋滞が発生し、渋滞が解消されてもいくつかの大きなクラスターに分かれて移動しているためすぐ渋滞が起こりやすく、局所的に速度は速くなるものの、端から端までの移動にかかる時間は長くなる (図4)。密度0.06のときは、 $f = 1.0$  や  $f = 0.0$  でも小規模なクラスターを形成しながら移動するが、渋滞は見られず、速度が異なるだけのように見える (図5、6)。しかし、 $f = 0.01$  の場合では密度0.04のときに比べて

デルでは右向きのアリ (粒子) と左向きのアリ (粒子) はフェロモンを共有しつつ、それぞれ別の空間 (車線) を移動するとしている。それに対し今回のモデルでは、全ての粒子は同じ空間上を移動するものとする。

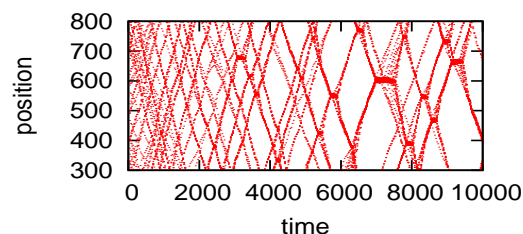


図4: 2車線、 $f = 0.01$ 、密度0.04のときの粒子の位置の時空間プロット (時間0から10000)。

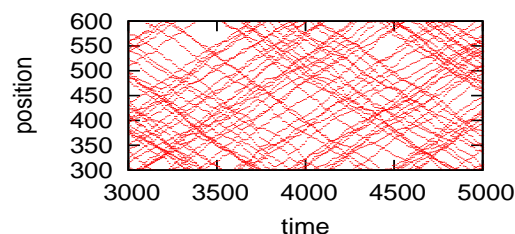


図5: 2車線、 $f = 1.0$ 、密度0.06のときの粒子の位置の時空間プロット (時間3000から5000)。

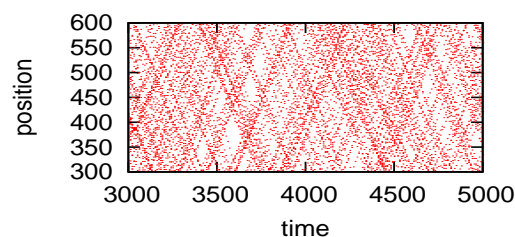


図6: 2車線、 $f = 0.0$ 、密度0.06のときの粒子の位置の時空間プロット (時間3000から5000)。

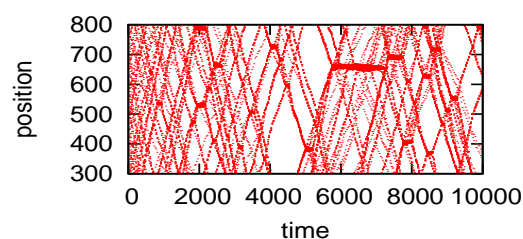


図7: 2車線、 $f = 0.01$ 、密度0.06のときの粒子の位置の時空間プロット (時間0から10000)。

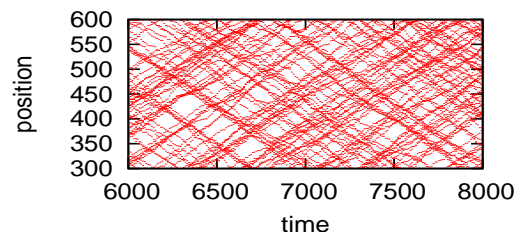


図8: 2車線、 $f = 1.0$ 、密度0.1のときの粒子の位置の時空間プロット (時間6000から8000)。

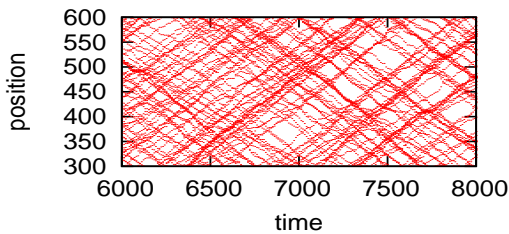


図 9: 2車線、 $f = 0.3$ 、密度 0.1 のときの粒子の位置の時空間プロット (時間 6000 から 8000)。

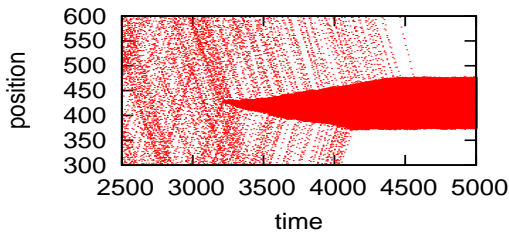


図 10: 2車線、 $f = 0.0$ 、密度 0.1 のときの粒子の位置の時空間プロット (時間 2500 から 5000)。

渋滞が維持されやすくなり、流量はかなり低い (図 7)。密度が 0.1、 $f = 1.0$  の場合は、進路として選択したセルにフェロモンがないことが多いため、平均移動速度は確率  $q (= 0.25)$  に近くなる (図 8)。同じ密度で  $f = 0.3$  の場合、小規模なクラスターを形成しても大きな渋滞が発生していないのは、クラスターの内部の粒子の間に間隔が空き、クラスター同士の衝突が起こった場合でもその間隔に粒子が入り込み、上手く避けながらすり抜けているためと考えられる (図 9)。 $f = 0.0$  の場合は、ほぼ全部のセルにフェロモンがあるので、速度は  $Q$  に近いはずである。時空間プロット (図 10) を見ると速い速度で道の一端からもう一端まで移動しているが、時間 3200 ステップを過ぎたあたりで渋滞が発生し、道が詰まってしまっているのが分かる。

#### 4 まとめと今後の展望

アリの走化性を模した相互作用する粒子による一方向通行及び双方向通行の振る舞いについて、特に車線数・フェロモンの蒸発率の変化に伴う、粒子の密度・流量の関係の変化を調べた。一方向・双方向のどちらも、道路の全長を一定に保ちながら車線数を増やすと、全体の概形は互いに類似しているものの、流量が最大となる密度は大きくなる傾向が見られた。これは、車線数が多くなれば、道が詰まっ

ているときでも前の車をよけながら進むことができる可能性が高くなるため、密度が大きくなっても移動の自由度が下がりにくいからだと考えられる。

また、一方向通行モデルでは粒子が一方向のみに向かうため、フェロモン蒸発率が低い程各粒子の速度が上がり、流量も大きくなる。それに対し、双方向通行モデルでは、粒子密度が低い場合、フェロモンが蒸発しない場合に流量が大きくなるが、粒子密度が増えた場合、ある最適なフェロモン蒸発率で最も流量が大きくなることがわかった。これは以下のようなことが原因で起こると考えられる。まず蒸発率が低い場合、粒子は前方に進みやすいため粒子全体の速度は大きくなるものの、そのため粒子間間隔が狭くなり、逆向きの粒子との衝突によって生じた渋滞を解消しにくくなる。それに対し、蒸発率が多少高い場合、粒子の移動速度がばらつくため流量はそれほど大きくはならないが、粒子の分布もばらつき、粒子間に間隔ができやすいため、逆向きの粒子との衝突によって生じる渋滞が維持されにくくなり、より大きな密度でも流れることができるようになる。

今回の研究では道路の全長に対し、車線数が少ない場合の粒子の動きを取り扱った。今後の研究課題は、粒子の混み具合を別の指標で表すことで、今回の結果を定性的に解析する必要がある。また、全長と車線数の比率を変えた場合の臨界密度や渋滞が発生しやすい (あるいは発生しにくい) フェロモンの蒸発率の変化や、移動確率を変化させた場合の流量の変化なども調べる必要がある。

#### 参考文献

- [1] T. Tao, H. Nakagawa, M. Yamasaki and H. Nishimori, "J. Phys.Soc.Jpn" **1244** (2002) 137-142
- [2] 西成活裕, "渋滞学", 新潮選書, (2006).
- [3] A. John, A. Schadschneider, D. Chowdhury and K. Nishinari, "J. Theo. Bio". **231** (2004) 279-285
- [4] A. Kunwar, A. John, K. Nishinari, A. Schadschneider, and D. Chowdhury, "J. Phys. Soc.Jpn" **73** (2004) 2979-2985
- [5] 飯塚剛, 鈴木迪子, "第 13 回交通流シンポジウム講演集" (2007) 81-84